

COMPORTAMENTO SÍSMICO DA ALVENARIA: ENSAIOS RECENTES



Paulo B. LOURENÇO
Professor Catedrático
Universidade do Minho, Guimarães



Alfredo CAMPOS COSTA
Investigador Principal.
LNEC, Lisboa

SUMÁRIO

A construção em geral tem exibido danos graves e colapso em muitos eventos sísmicos fortes recentes, particularmente no património construído mais antigo e países onde a cultura sísmica está pouco presente. Sabe-se que o comportamento relativamente frágil da alvenaria pode conduzir a respostas estruturais muito deficientes no caso de um projeto ou construção desadequados. A combinação de baixa resistência à tração, massa elevada e ligação insuficiente entre elementos construtivos em elementos em alvenaria é um cenário que não pode ser colocado na construção nova. Nesta comunicação apresenta-se um conjunto de ensaios sísmicos recentes incluindo: (a) Um sistema de construção de edifícios de alvenaria não armada, usando blocos de betão; (b) Um dispositivo e uma metodologia experimentais para a realização de ensaios sísmicos em paredes de alvenaria de enchimento inseridas em pórticos de betão armado. Inicialmente, apresentam-se ensaios dinâmicos de edifícios de dois pisos à escala reduzida (1:2) em alvenaria estrutural, com e sem assimetria em planta. Em seguida, apresenta-se o dispositivo de ensaio desenvolvido no LNEC e os resultados de ensaios em dois panos de parede à escala real. A análise experimental fornece padrões de fendilhação, mecanismos de rotura e fatores de comportamento, permitindo obter um contributo valioso para a compreensão da resposta das paredes em alvenaria.

1. ALVENARIA ESTRUTURAL NÃO ARMADA

Os edifícios de alvenaria representam o sistema construtivo mais utilizado em todo o mundo desde o início da civilização. Existem diversos estudos que demonstram a elevada vulnerabilidade sísmica deste tipo de construção aos sismos [1]. O colapso total ou parcial de edifícios de alvenaria não armada durante um sismo ocorre devido essencialmente à deficiente qualidade dos materiais e tecnologia de construção, à falta de ligação entre as paredes, e à falta de ligação entre paredes e pisos. Esta situação foi responsável pela redução progressiva da utilização da construção em alvenaria não armada em vários países. Em Portugal, a alvenaria estrutural quase desapareceu ao longo do último século, sendo a mesma utilizada quase exclusivamente como paredes de alvenaria não-resistente em sistemas estruturais com estrutura de betão armado e, em alguns casos, em sistemas de alvenaria face à vista [2].

1.1. Sistema construtivo

O sistema construtivo proposto para alvenaria estrutural é baseado em blocos de betão com duas ou três células, ver Fig. 1, sendo que o bloco de três células permite colocar armadura vertical contínua no interior da alvenaria. As unidades de alvenaria têm a geometria de 400 x 200 x 190 mm³ e pertencem ao grupo 2 do Eurocódigo 6, com uma percentagem média de furação vertical de 46%. A espessura média dos septos é de cerca de 30 mm. Informação adicional sobre o sistema e os resultados experimentais pode ser obtida em [3,4].

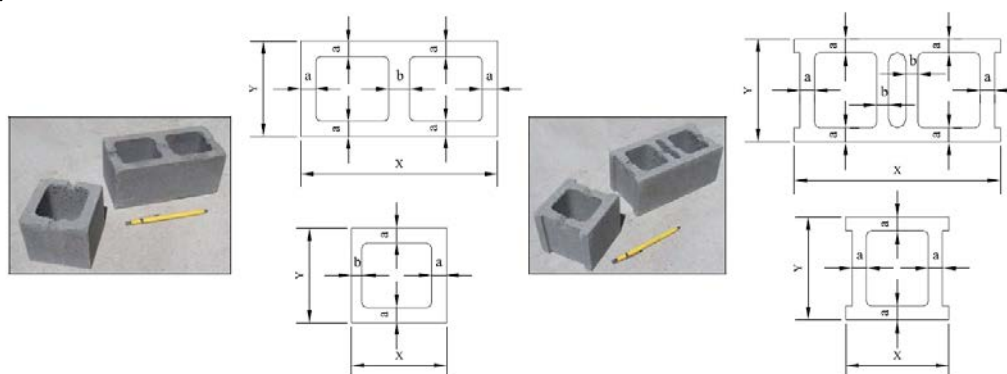


Figura 1 : Blocos de betão desenvolvidos com duas e três células.

1.2. Modelos

O protótipo representa um edifício residencial com dois andares e uma altura de 3.0 m entre pisos, com geometria regular e irregular, ver Fig. 2. Os pisos são em lajes de betão armado e funcionam como diafragmas rígidos. No caso do edifício regular as duas fachadas opostas possuem uma percentagem de aberturas de cerca de 14%, com outras duas paredes sem aberturas (paredes norte e sul). Estas correspondem às paredes de contactam com os lotes vizinhos, situação corrente em moradias em banda. No caso do edifício irregular, para aumentar os efeitos de torção e a assimetria do conjunto, optou-se por colocar aberturas em três fachadas.

Devido a restrições de ensaio, tal como o tamanho e carga na mesa sísmica, a maioria dos testes em mesa sísmica são realizadas em modelos à escala que podem ser considerados representativos das estruturas de protótipo. A mesa sísmica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, Portugal, está entre os maiores da Europa, com uma plataforma de dimensões de 4.6 m x 5.6 m em planta e uma carga útil de 400 kN. Assim, foi decidido construir uma modelo de escala reduzida 1:2, tendo em conta as leis de escala adequadas. A aplicação da semelhança entre o modelo e a construção real, implica que os padrões de dano e os mecanismos de rotura obtidos a partir de ensaios dinâmicos no modelo são similares aos observados na construção real (protótipo) depois de um sismo.

Desta forma, o modelo tem dimensões de 4.20 x 3.40 m² em planta e 3.0 m de altura, com uma espessura de parede de 0.1 m. A altura entre pisos é de 1.4 m com aberturas de janelas de 0.8 m x 0.5 m e aberturas de porta de 0.5 m x 1.1 m. As propriedades dos materiais do modelo experimental devem ser iguais às do protótipo, nomeadamente em termos de resistência à compressão, resistência ao corte e módulo de elasticidade. As unidades de alvenaria foram produzidas em escala reduzida de 1:2, com uma composição de microbetão adequada. Os modelos foram instrumentados com três dispositivos diferentes, nomeadamente acelerómetros, transdutores de deslocamento (LVDT) e detetores de posição sensíveis (PSD). Estes dispositivos de medida foram utilizados para monitorizar as acelerações, assim como os deslocamentos locais e globais, respetivamente.

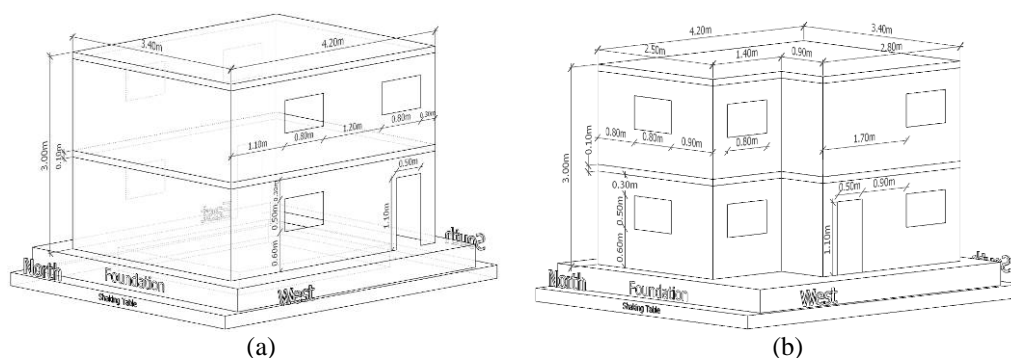


Figura 2 : Protótipos de edifícios para ensaio na mesa sísmica: (a) regular; (b) irregular.

1.3. Ação sísmica

O movimento do solo produzido por um sismo pode ser representado por três componentes (duas horizontais e uma vertical), mas no ensaio apenas foram consideradas as duas componentes horizontais com sinais não correlacionados, e de acordo com o espectro de resposta elástica fornecido pelo Eurocódigo 8. A Fig. 3 apresenta o espectro regulamentar e um exemplo de um acelerograma artificial gerado compatível com o espectro, com uma duração total de cerca de 15 s. Foi adotado o espectro de resposta elástica da região de Lisboa (aceleração na base de 0.15 g), considerando ação sísmica tipo 1, tipo de solo A e 5% de amortecimento. Posteriormente, o sinal foi aumentado de forma proporcional até obter o colapso do edifício.

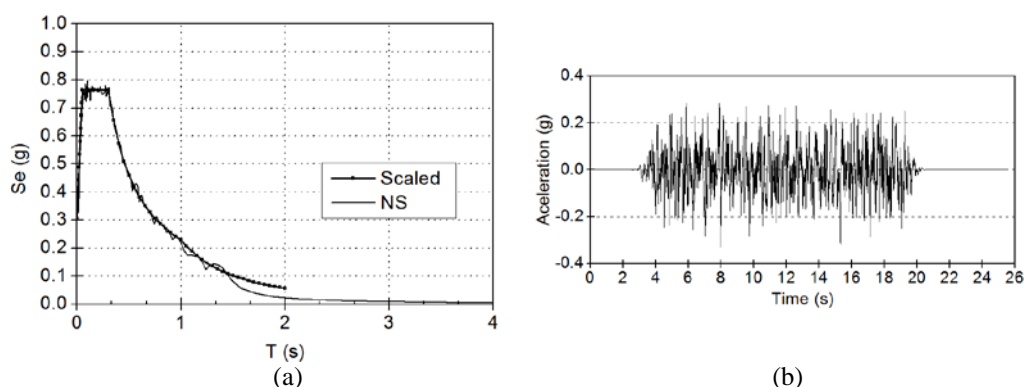


Figura 3 : Definição da ação sísmica adotada: (a) espectro regulamentar para projeto, escalado; (b) exemplo de acelerograma.

1.4. Resultados para o edifício regular

O padrão de fendilhação e dano obtidos para o último estágio está apresentado na Fig. 4. A ação sísmica foi aumentada até 2.5x (250%) do valor do regulamento. O modelo apresenta uma grande densidade de fendas e dano severo, incluindo fendas de deslizamento na base, a meia altura e no topo das paredes com um grande desenvolvimento, fendas diagonais de corte (particularmente nos nêmbos) e esmagamento localizado da alvenaria nos nêmbos. Esta combinação de fendas divide o modelo em macroblocos quase horizontais e promove mecanismos de deslizamento durante os ensaios sísmicos. A abertura de fendas durante o ensaio foi significativa, com valores máximos de abertura superiores a 50 mm. Observa-se ainda que o fator de comportamento calculado com base nos envelopes de corte na base atinge um valor mínimo de 2,0 ou 3,0, de acordo com a definição do deslocamento máximo.

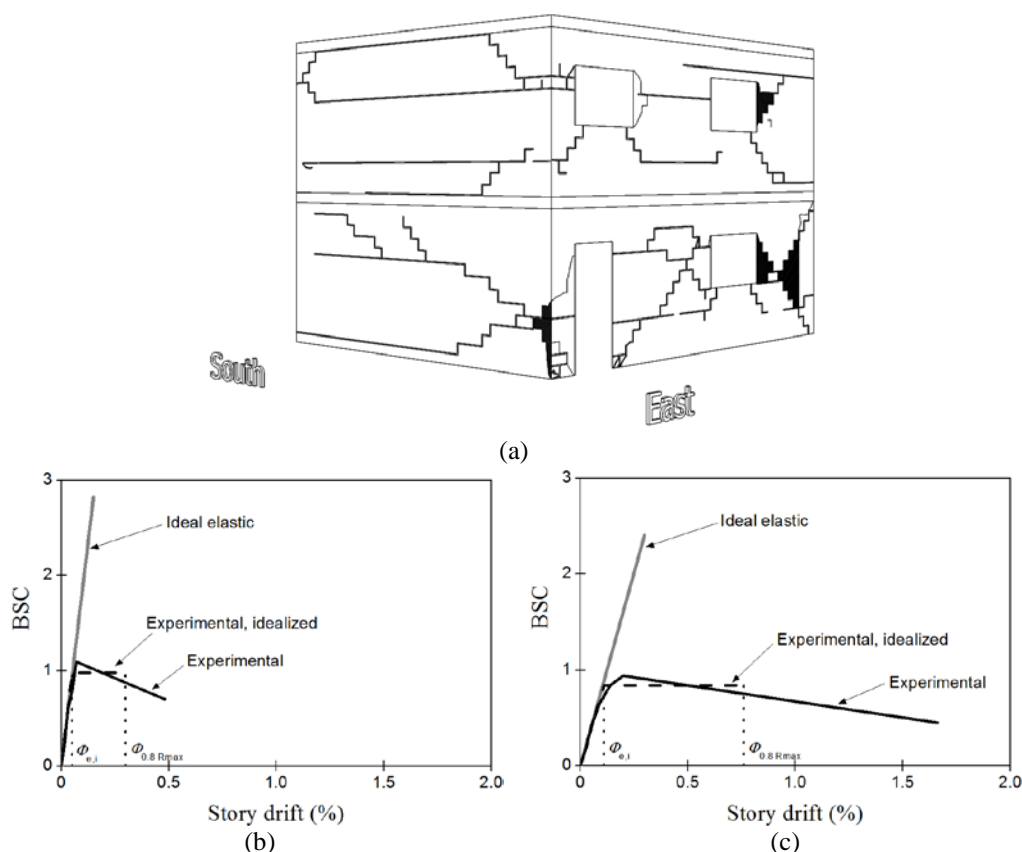


Figura 4 : Resultados experimentais: (a) Dano final; (b) envelope do corte na base vs. *drift* na direção longitudinal; (c) envelope do corte na base vs. *drift* na direção transversal .

1.5. Resultados para o edifício irregular

O padrão de fendilhação e dano obtidos para o último estágio está apresentado na Fig. 5. A ação sísmica foi aumentada até 1.5x (150%) do valor do regulamento. Do comportamento global do edifício destaca-se o importante dano apresentado e que ocorreu ao longo dos diversos incrementos de carga, particularmente nos últimos estágios. As primeiras fendas apareceram no ensaio de 50%, nomeadamente perto das janelas do primeiro andar nas paredes Este e Oeste. Estas fendas são diagonais e apresentam uma espessura muito reduzida. Durante o ensaio de 75% iniciou-se a abertura de fendas no segundo andar, com o desenvolvimento de uma fenda de grande comprimento afetando várias paredes, que se inicia no canto da janela da parede Oeste de maior extensão, baixando diagonalmente duas unidades para atravessar horizontalmente o troço pequeno da parede norte e continuando horizontalmente na parede Oeste até à altura do canto da janela. Nesta fase a fenda apresenta uma espessura muito pequena, mas suficiente para ser identificada.

No ensaio de 100% o modelo apresenta um dano distribuído espalhado por todo o edifício, no primeiro e no segundo andar. No ensaio de 150%, o comprimento das fendas aumenta. Na parede Este dá-se o início à formação de fendas diagonais no painel entre a janela e a porta. No segundo andar verifica-se o colapso de alguns blocos na interseção das paredes Oeste-Sul ao nível da sexta fiada. O último ensaio consistiu na aplicação do mesmo sismo, verificando-se o aumento da abertura de fendas e a instabilização de blocos nos cunhais do edifício traduzindo-se na sua queda, principalmente no canto Oeste-Sul. Adicionalmente, verificaram-se deslizamentos ao longo das juntas já abertas, o que resultou no desaprumo das paredes. Apesar do dano ser muito considerável, verifica-se que não ocorreu o colapso total da estrutura.

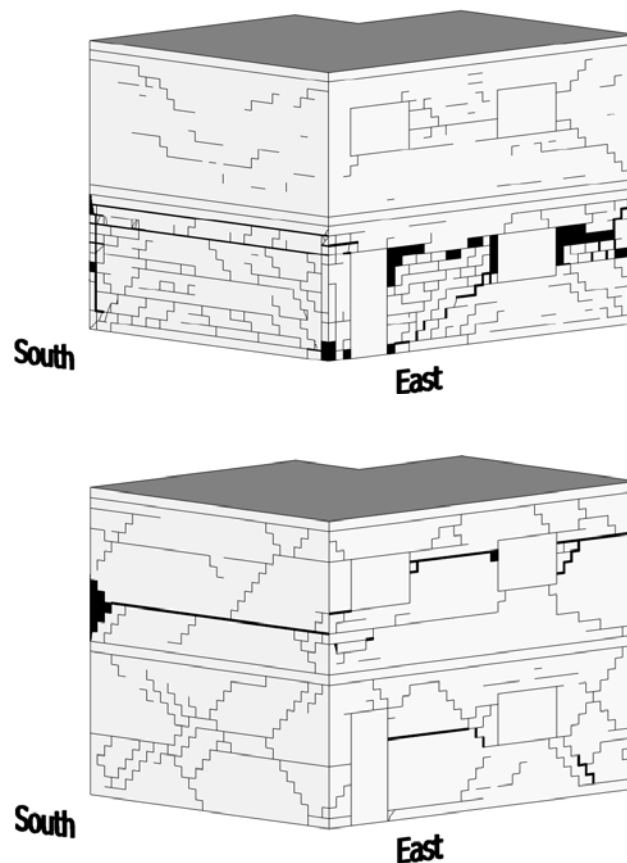


Figura 5 : Resultados experimentais e dano final

2. ALVENARIA DE ENCHIMENTO

As paredes de alvenaria de enchimento contribuem significativamente para o comportamento sísmico do sistema estrutural. A teoria e a prática têm demonstrado repetidamente que as paredes de enchimento em alvenaria podem afetar de forma positiva o comportamento sísmico de edifícios, desde que eventuais interações negativas entre o enchimento e a estrutura sejam evitadas. Os danos em paredes de alvenaria podem, de forma simplificada, ser classificados em dois tipos: (a) colapso para fora do plano da parede, habitualmente com perda de vidas humanas devido ao derrube e queda da parede e custos elevadíssimos de reconstrução pós-sismo; (b) danos no plano da parede, mesmo em caso de danos reduzidos ou inexistentes na estrutura resistente, habitualmente com custos de reconstrução e reabilitação pós-sismo elevados.

Informação sobre uma campanha, com grande dimensão, de ensaios experimentais em Portugal foi apresentada em [5]. No novo sistema desenvolvido no LNEC [6], a base do pórtico a ensaiar é fixa à mesa sísmica e a viga superior é ligada a uma parede de reação. O movimento da mesa na direção do plano da parede implica dessa forma a imposição de uma deformação relativa, dinâmica, entre o topo e a base do pórtico. Ao mesmo tempo, uma estrutura auxiliar garante que o movimento dinâmico da mesa, na direção perpendicular, é imposto como um movimento de corpo rígido ao pórtico, deixando a parede em vibração forçada devido às forças de inércia que se desenvolvem para fora do seu plano.

2.1. Dispositivo

Raramente foram realizados ensaios em que se apliquem solicitações simultaneamente no plano da parede e para fora do seu plano. Este é um inconveniente óbvio dos ensaios existentes em painéis de alvenaria, uma vez que a ação sísmica nunca atua isoladamente numa direção. Por outro lado, os ensaios realizados na mesa sísmica em edifícios completos reportados em [5] utilizam modelos à escala e dificilmente permitem obter respostas pré-determinadas em termos de ações no plano e fora do plano. Assim, foi desenvolvido um dispositivo de ensaio inovador denominado por “Testing device for Innovative Masonry infills” (TIM), que utiliza o conceito de subestruturação e utiliza simultaneamente a mesa sísmica triaxial e uma das paredes de reação do LNEC.

O dispositivo e a metodologia de ensaio desenvolvidos pretendem simular a resposta sísmica de uma subestrutura representativa de um edifício em betão armado com paredes de enchimento em alvenaria. Como ilustrado na Fig. 6, o ensaio utiliza um pórtico em quadro fechado preenchido com alvenaria de tijolo vazado tradicional, podendo ter ou não reboco e reforços. A Fig. 7 apresenta uma vista global do dispositivo, em que os nós pilar/viga na base do pórtico se encontram apoiados em rótulas cilíndricas e a viga superior do pórtico se encontra ligada por uma escora à parede de reação, de muito elevada rigidez, adjacente à mesa sísmica. Quando a mesa sísmica se move na direção longitudinal, desenvolve-se um deslocamento relativo entre a viga superior e a viga inferior do pórtico, representativo do que sucede entre os pisos de um edifício sob a ação sísmica. Por outro lado, os pilares do pórtico são pré-esforçados de forma a assegurar uma compressão correspondente ao peso dos pisos superiores do edifício. O dispositivo de ensaio foi idealizado por forma a conceder grande flexibilidade na definição da geometria e pormenorização dos painéis de alvenaria a ensaiar.

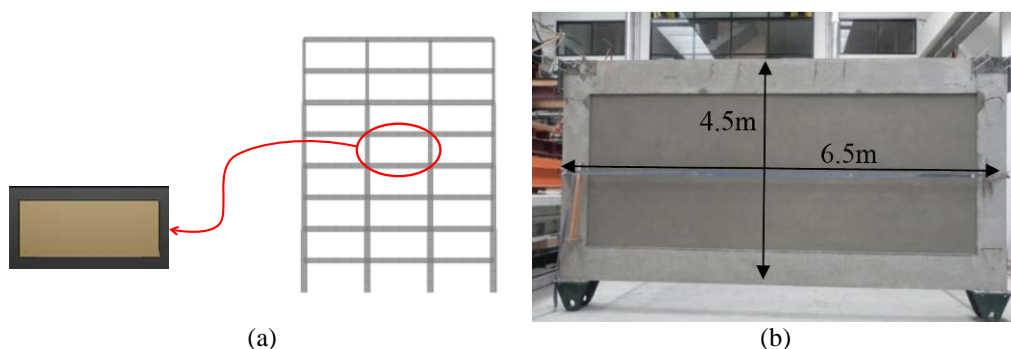


Figura 6 : Painel representativo de um edifício em betão armado, porticado e com paredes de enchimento em alvenaria: (a) representação esquemática; (b) modelo de ensaio à escala real

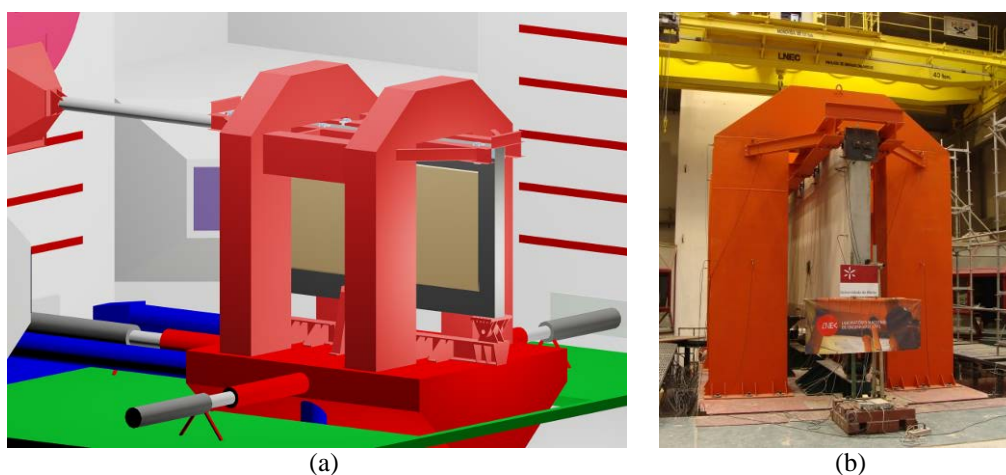


Figura 7 : Representação global do dispositivo de ensaio

Os movimentos sísmicos a considerar nas duas direções horizontais dependem do edifício que se pretende simular (geometria, materiais, localização, solo de fundação, etc.). Em termos gerais, pode afirmar-se que tanto o movimento no plano da parede como o movimento para fora do plano da parede devem corresponder ao movimento do piso considerado e devem ter um conteúdo em frequência de banda estreita. De facto, o movimento no plano da parede, que simula o deslocamento relativo entre pisos, será maioritariamente condicionado pelos modos de vibração correspondentes às frequências de vibração mais reduzidas. Por outro lado, as frequências de vibração associadas às forças de inércia perpendiculares ao painel de alvenaria e representativas dos seus modos de vibração locais corresponderão a frequências bastante mais elevadas e estarão associados às acelerações absolutas sentidas ao nível do piso em estudo.

O cenário sísmico considerado é o mesmo do capítulo anterior. A ação sísmica ao nível do solo foi aplicada a um modelo numérico de um edifício representativo, de forma a obter as histórias de deslocamento relativo entre pisos - ação no plano - e de acelerações absolutas - ação para fora do plano - para um painel porticado situado no 4º piso. As ações obtidas para aplicação à subestrutura a ensaiar encontram-se representadas na Fig. 8.

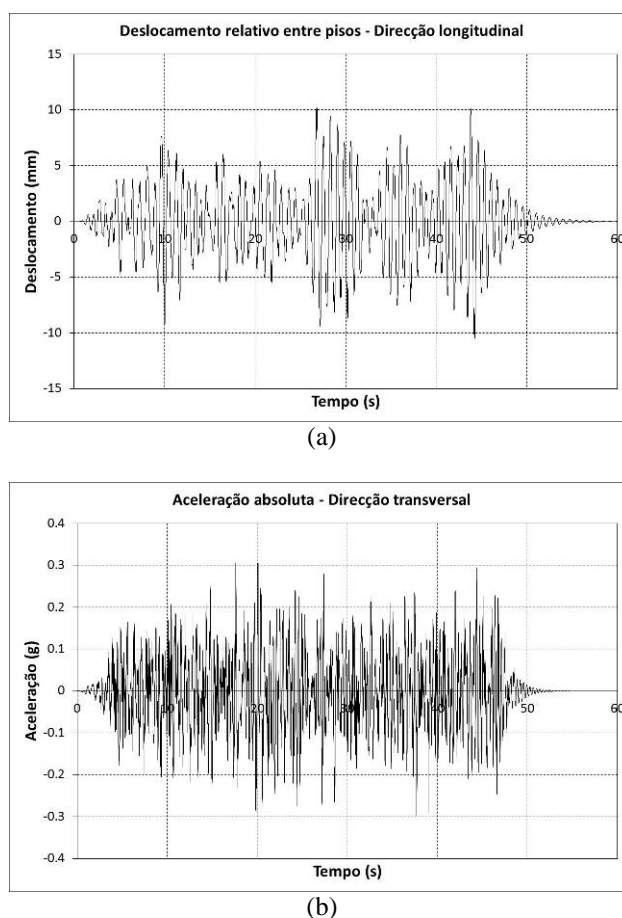


Figura 8 : Histórias de deslocamentos e acelerações a aplicar à subestrutura, no seu plano (direção longitudinal) e para fora do plano (direção transversal)

2.2. Resultados dos ensaios

Foram ensaiados dois modelos de parede tradicional com e sem armadura de junta, estando ainda a ser tratados os resultados dos ensaios. No modelo com alvenaria não armada, ocorreu a formação de um mecanismo de rotura no plano da parede, constituído maioritariamente por

uma fenda horizontal a 1/3 de altura com ramificações diagonais para os cantos da parede (ver Fig. 9). A evolução desse mecanismo consistiu na formação de novas fendas horizontais acima da inicial e extensão dos danos nos cantos da parede. Finalmente, a ação transversal levou à destruição de tijolos na fiada superior e a um decréscimo da frequência própria de vibração do pano de alvenaria para fora do seu plano de um valor inicial perto dos 20 Hz para um valor final de cerca de 3 Hz.



Figura 9 : Evolução do dano observado na parede de alvenaria não armada

A Fig. 10 apresenta a resposta da parede no seu plano em termos da força horizontal aplicada e do deslocamento associado à variação de comprimento da diagonal da parede, medido através de um transdutor de deslocamento. A cinza está representada a resposta correspondente a 63% do nível de referência, onde é visível a abrupta diminuição de rigidez quando aparece a fenda horizontal inicial. A preto representa-se a resposta correspondente ao nível de referência da ação sísmica. Pode verificar-se que a rigidez não se degrada significativamente entre os dois níveis, mas durante a atuação do sismo de referência dá-se uma nova degradação de rigidez, associada a maior fendilhação da parede.

Finalmente, a Fig. 11 apresenta os resultados da parede com armadura de junta. Verifica-se um mecanismo de rotura semelhante à parede não armada, tal como em [5], uma vez que o nível de armadura considerado é baixo e pretende apenas controlar a fendilhação. Um aspeto relevante é que a parede se mantém no seu plano mesmo após um nível de dano francamente excessivo, o que permitirá salvar certamente vidas e limitar o colapso fora do plano da parede em caso de sismos fortes.

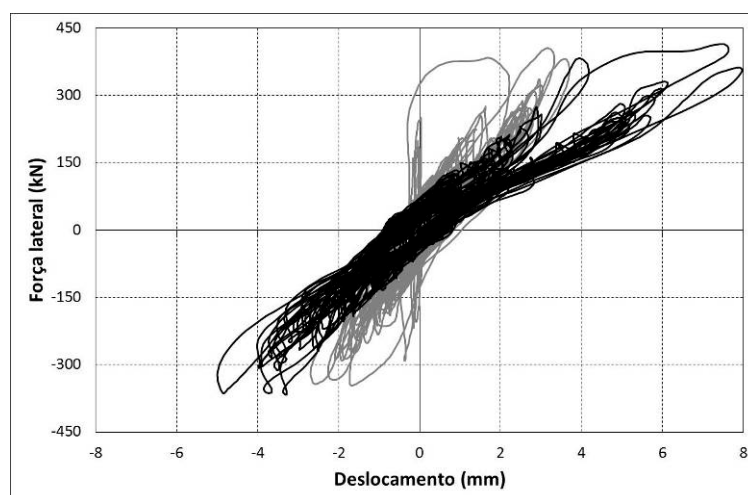


Figura 10 : Resposta no plano da parede para os dois níveis crescentes de ação sísmica



Figura 11 : Evolução do dano observado na parede de alvenaria armada

3. CONCLUSÕES

É possível obter excelente desempenho sísmico no caso de alvenaria não armada moderna. A solução proposta com alvenaria não armada de blocos de betão apresentou um bom comportamento para níveis moderados de ação sísmica, e considera-se que a solução pode ser uma solução competitiva para edifícios de médio porte em regiões de sismicidade baixa e moderada.

A necessidade de salvar vidas e limitar os custos económicos implica uma melhor compreensão do comportamento das paredes de enchimento, bem como projeto de engenharia e construção adequados. O dispositivo inovador de ensaio desenvolvido no LNEC permite agora realizar uma campanha de ensaios única para caracterização deste elemento construtivo.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento pelo financiamento atribuído ao projeto SERIES através do 7º programa-quadro de apoio da União Europeia e ao projeto ALVEST, “Desenvolvimento de soluções de paredes de alvenaria estrutural”, (projeto QREN nº 5456), bem como a todos os participantes no projeto e, em particular, aos investigadores do LNEC e da UMinho que colaboraram nestes ensaios.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Bruneau, M. - “State of the art report on seismic performance of unreinforced masonry buildings” *Journal of Structural Engineering*, 120(1), 230-251, 1994.
- [2] Lourenço, P.B. - “Design of large size non-loadbearing masonry walls: Case studies in Portugal. Technical and economical benefits” *Proceedings of the 13th International Brick and Block Masonry Conference*. Amsterdam, 661-668, 2004.
- [3] Haach, V.H. - “Development of a design method for reinforced masonry subjected to in-plane loading based on experimental and numerical analysis”, Tese de doutoramento, Universidade do Minho. Guimarães, 2009. Disponível em www.hms.civil.uminho.pt.
- [4] Avila, L. - “Seismic behavior of concrete block masonry buildings”, Tese de doutoramento, Universidade do Minho. Guimarães, 2014. Disponível em www.hms.civil.uminho.pt.
- [5] Lourenço, P.B., Paulo-Pereira, M.F., Leite, J., Campos-Costa, A., “Comportamento das paredes não estruturais a ações sísmicas”, *Atas de Paredes 2011. Paredes Divisórias: Passado, presente e futuro*, Universidade do Minho, Porto, p. 97-109, 2011.
- [6] Correia, A.A., Campos Costa, A., Candeias, P.X., Lourenço, P.B., *Ensaio sísmicos inovadores de pórticos com paredes de enchimento em alvenaria*, *Atas das 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, Novembro, 26-28, 15 pp, 2014.